



Projekt Post-ISS

Post-ISS: Konzeptbewertung

AP 2000



Dokumenteigenschaften

Titel	Post-ISS: Konzeptbewertung
Betreff	Dokumentation zu AP 2000 des Projektes "Post-ISS"
Institut	Institut für Raumfahrtssysteme
Erstellt von	V. Vrakking, D. Quantius, C. Zeidler
Beteiligte	C. Philpot, O. Romberg
Geprüft von	O. Romberg
Freigabe von	M. Wassmann
Datum	16-11-2016
Version	1.0
Dateipfad	https://svn.dlr.de/Post-ISS/Work Packages/2000-Konzeptbewertung/DLR-RY-Post-ISS-AP2000.pdf

Inhaltsverzeichnis

Dokumenteigenschaften	2
1. Einleitung.....	5
2. Bewertungsmethode (AP 2100).....	6
2.1. AHP-Bewertung	6
3. Bewertung zukünftig möglicher Post-ISS-Konzepte (AP 2200).....	10
3.1. Bewertungskriterien	10
3.2. Anwendung des AHP auf Bewertungskriterien	14
3.2.1. Politische Bewertungskriterien (aus Sicht Europas)	14
3.2.2. Politische Bewertungskriterien (aus Sicht International)	15
3.2.3. Soziale Bewertungskriterien	16
3.2.4. Technische Bewertungskriterien.....	18
3.2.5. Ökonomische Bewertungskriterien.....	20
4. Bewertung der Anwendungen (AP 2300)	22
5. Interdisziplinärer Konzepte-Workshop (AP 4100)	23
5.1. Workshop-Ziele.....	23
5.2. Rahmenbedingungen.....	23
5.3. Modulfunktionen	24
5.4. Architektur-Optionen	25
5.4.1. Vorgehensweise	25
5.4.2. Beschreibung der Option A: Mini-Station unter europäischer Führung.....	26
5.4.2.1. Option A.1: Beobachtungsplattform.....	27
5.4.2.2. Option A.2: Station mit integrierten Komponenten.....	28
5.4.2.3. Option A.3: Station mit entkoppelbaren Komponenten.....	30
5.4.2.4. Option A.4: Gemischte Missionsziele, Habitat mit Laborfunktion, entkoppelbares Labor und Plattform.....	31
5.4.3. Beschreibung Option B: Internationale Großstation	32
6. Bewertung der Szenarien (AP 2400).....	34
7. Zusammenfassung	38
Abbildungsverzeichnis	39
Tabellenverzeichnis	39

Formelverzeichnis	40
Literaturverzeichnis	40
Abkürzungsverzeichnis	41

1. Einleitung

Alle Partner der Internationalen Raumstation (ISS) haben einer Nutzung der orbitalen Forschungseinrichtung bis zum Jahr 2020 zugestimmt. NASA, Roscosmos und CSA haben darüber hinaus angekündigt, die Beiträge zur ISS noch bis zum Jahr 2024 zu verlängern. Ob dieses Vorhaben aus politischer, technologischer und finanzieller Sicht für alle Partner machbar ist, bleibt ungewiss. Die übergreifende Frage für alle Nutzer ist, ob und in welcher Weise Sie ihre Forschungen im All fortführen können. Im Allgemeinen beträgt die Dauer einer Übergangsphase bis hin zu einem neuen Konzept - ohne den Verlust von kritischem Know-How - ungefähr 10 bis 15 Jahre. Aus diesem Grund muss eine entsprechende technische Road-Map und die Entwicklung eines bemannten Raumfahrtkonzeptes aus deutscher und europäischer Sicht schon jetzt begonnen werden. Das DLR Projekt „POST-ISS“ (Systemanalyse Studie) kann als vorbereitende Arbeit auf nationaler Ebene zur Schaffung eines zukünftigen bemannten Raumfahrtprogramms verstanden werden. Nur damit kann Europa auf lange Sicht die Aktivitäten für Forschung und der Astronauten im niederen Erdorbit (LEO) sichern. Dies führt sinngemäß zu der Frage:

Wie lassen sich Weltraumforschung und –technologieentwicklung nach der Nutzungsphase der ISS (~2024) fortführen?

Zur Bearbeitung dieser Leitfrage wurden folgende Ziele für die DLR Studien definiert:

- Analyse der Vor- und Nachteile der ISS und Empfehlungen anhand der gewonnenen Erkenntnisse (Lessons-Learnt)
- Marktanalyse zu bestehenden Technologien und Techniken
- Analyse von zusätzlichen Nutzernachfrage und Nutzungsmöglichkeiten unter Einbezug weiterer wissenschaftlichen Disziplinen und technologischer Recherche
- Entwurf Infrastrukturkonzepten in Einklang mit Nutzeranforderungen zur Fortführung der bemannten Raumfahrt im LEO
- Analyse der Wiederverwendbarkeit vorhandener Architekturen

In diesem Bericht werden die Ergebnisse der Konzeptbewertung, die innerhalb der Arbeitspakete 2000 durchgeführt wurde, beschrieben. Die Konzeptbewertung umfasst die Auswahl des bestgeeigneten Konzeptes bezüglich der vordefinierten Kriterien. In diesem Bericht wird erst die Bewertungsmethode erklärt, dann werden die Bewertungskriterien definiert und in eine Rangfolge der Wichtigkeit gebracht. Ein interdisziplinärer Konzepte-Workshop wurde innerhalb der Arbeitspakete 4000 durchgeführt. Die Ergebnisse werden hier beschrieben. Letztendlich werden vier Konzepte dieses Workshops bewertet und es wurde einer der Konzepte ausgewählt und in einem späteren Arbeitsschritt weiterentwickelt.

2. Bewertungsmethode (AP 2100)

Die Entscheidung zwischen verschiedenen Entwürfen oder Konzepten soll objektiv und systematisch getroffen werden. Zu diesem Zweck stehen verschiedene Methoden und Prozesse zur Verfügung und sind abhängig von u.a. der Anzahl der Alternativen und deren Detaillierungsgrad. Für die Bewertung der POST-ISS Konzepte wurde der Analytische Hierarchieprozess (AHP) gewählt.

2.1. AHP-Bewertung

Der Analytische Hierarchieprozess ist eine Methode zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen, um eine gewisse Anzahl von Kriterien oder Alternativen (z.B. unterschiedliche Designkonzepte) zu vergleichen und eine rationale Entscheidung treffen zu können. Entwickelt wurde diese Vorgehensweise vom US-amerikanischen Mathematiker Thomas L. Saaty [1] [2] [3] [4].

Im ersten Schritt werden dazu die verschiedenen Alternativen, zwischen denen eine rationale Entscheidung getroffen werden soll, ermittelt. Zusätzlich ist es nötig, eine Reihe von Entscheidungskriterien O (unsortierte Reihenfolge) zu definieren, die als Grundlage für den Vergleich verwendet werden können.[3] Ziel ist es, mit Hilfe der gesammelten Kriterien normalisierte Gewichtungsfaktoren zu erstellen, die beim Vergleich der Alternativen genutzt werden können. Hierfür werden die Kriterien im zweiten Schritt paarweise mit einander verglichen und so in eine Rangfolge gebracht. Zur Bewertung wird eine 1-9 Skala genutzt. Je nach Wichtigkeit des Kriteriums O_i im Vergleich zu O_j wird eine der folgenden Bewertungspunkte verwendet [1] [3] [4]:

Tabelle 1: Bedeutung der Bewertungspunkte für die Entscheidungskriterien des Analytischen Hierarchieprozesses (*)

Bewertungspunkte	Bedeutung
1	O_i gleiche Bedeutung wie O_j
3	O_i etwas größere Bedeutung als O_j
5	O_i sehr viel größere Bedeutung als O_j
7	O_i erheblich größere Bedeutung als O_j
9	O_i absolut dominierend zu O_j
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte

(*) Reziproke Werte der Bewertungspunkte werden verwendet, wenn die Bedeutung des Kriteriums O_j die von O_i überwiegt.

Die Ergebnisse des Vergleichs werden in einer sogenannten *Paarweisen Vergleichsmatrix* M eingetragen, wobei die Nummer in Zeile i und Spalte j die relative Bedeutung von O_i verglichen mit O_j verdeutlicht. Bei Annahme von vier Entscheidungskriterien könnte folgende Matrix M entstehen [1] [3] [4], wobei die dargestellte Zahlen nur Beispiele sind:

Tabelle 2: Paarweise Vergleichsmatrix, M

1,000	0,200	0,333	0,143
5,000	1,000	3,000	5,000
3,000	0,333	1,000	3,000
7,000	0,200	0,333	1,000

Im nächsten Schritt werden die Gewichtungsfaktoren aus Matrix M normalisiert. Dazu werden die Ziffern der einzelnen Spalten durch die Summe der zugehörigen Spalte dividiert. Das Ergebnis dieser Rechnung ist in der folgenden Matrix \bar{M} dargestellt und enthält die normalisierten Werte aus Matrix M [1]:

Tabelle 3: Normalisierte Paarweise Vergleichsmatrix, \bar{M}

0,063	0,115	0,071	0,016
0,313	0,577	0,643	0,547
0,188	0,192	0,214	0,328
0,438	0,115	0,071	0,109

An Matrix \bar{M} fällt auf, dass die Ziffern der zweiten Zeile größer sind als die jeder anderen Zeile mit Ausnahme von Spalte eins. Dies ist ein Anzeichen für einen inkonsistenten Vergleich der Kriterien in der Originalmatrix. In diesem Fall müsste eine neue Paarweise Vergleichsmatrix angefertigt und der Prozess von vorne begonnen werden.

Für den Fall einer durchgehend konsistenten Bewertung würden alle Werte einer Reihe größer als die der anderen Reihen sein. Im vierten Schritt werden die Durchschnittswerte jeder Zeile errechnet. Das hieraus resultierende Ergebnis stellt die gesuchten normalisierten Gewichtungsfaktoren (NWF) für die vier Kriterien dar [1]:

Tabelle 4: Normalisierte Gewichtungsfaktorenmatrix, w

O₁	O₂	O₃	O₄
0,066	0,520	0,231	0,183

Die Summe aus diesen Faktoren ist konstruktionsbedingt immer gleich eins. Je höher der Wert der normalisierten Gewichtungsfaktoren, desto größer ist ihre Wichtigkeit und der Einfluss auf die Auswahl der Alternativen [1].

Die Vereinbarkeit der Matrix wird im fünften Schritt geprüft. Erst werden die Eigenwerten der Matrix ausgerechnet. Hierzu wird Matrix M mit den normalisierten Gewichtungsfaktoren, w, multipliziert, was resultiert in folgende Matrix.

Tabelle 5: Matrix resultierend aus Multiplizierung von Matrices M und w

0,066	0,104	0,077	0,026
0,33	0,520	0,693	0,915
0,198	0,173	0,231	0,549
0,462	0,104	0,077	0,183

Die Zahlen einer Reihe werden summiert und durch die Zahlen auf der Diagonalen, in der Tabelle in Rot angegeben, geteilt um den Eigenwert zu bekommen. Für die dritte Reihe, zum Beispiel, ist der Eigenwert:

$$\lambda = \frac{0,198 + 0,173 + 0,231 + 0,549}{0,231} = 4,983.$$

Formel 1: Beispiel Eigenwert Berechnung

Die Summe der Eigenwerten, geteilt durch die Anzahl der Kriterien, führt zu dem 'maximalen Eigenwert', λ_{\max} . Aus diesem Wert, und die Anzahl der Kriterien, kann der Konsistenz-Index (CI) berechnet werden, mittels der folgenden Formel.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}.$$

Formel 2: Konsistenz-Index

Anschließend wird eine Konsistenz-Beziehung (CR) ausgerechnet und durch den CI-Wert geteilt, um auf den 'zufälligen Konsistenz-Faktor (R)' zu kommen. Der R-Wert ist abhängig von der Anzahl der Kriterien und kann aus Tabelle 6 abgelesen werden.

Tabelle 6: 'Zufällige Konsistenz-faktor', R, als Produkt des Anzahl der Kriterien

Anzahl Kriterien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	0.00	0.00	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Wenn der CR-Wert kleiner ist als 0,1 dann kann die Vergleichsmatrix als konsistent angenommen werden. Falls der Wert größer als 0,1 ist, muss der paarweise Vergleich nochmals durchgeführt werden.

Im letzten Schritt findet eine Einschätzung statt, wie gut jede Alternative bezüglich der zuvor untereinander verglichenen Kriterien ist. Für diese Einschätzung wird eine Skala von -3 bis +3 genutzt (+3=beste; -3=schlechteste). Um eine Entscheidung treffen zu können, werden abschließend die Zahlenwertung der gerade getätigten Einschätzung mit den normalisierten Gewichtungsfaktoren des zugehörigen Kriteriums multipliziert. Dies wird pro Alternative für jedes Kriterium durchgeführt.

Im Anschluss werden die Ergebnisse der Multiplikation addiert und für alle Alternativen wird ein Entscheidungswert, der mit den übrigen Werten verglichen wird, erhalten. Das so entstandene Ranking spiegelt die Güte der einzelnen Alternativen wieder. Je höher der Entscheidungswert, desto besser ist die gewählte Alternative [1] [3].

Der AHP kann auf mehrere Ebenen angewendet werden, falls zum Beispiel die Bewertung eines Kriteriums auf 'sub-Kriterien' basiert. Wie im nächsten Kapitel erläutert wird, wurden vier Kriterien für die Evaluierung der Post-ISS Konzepte definiert: Politische, Soziale, Technische und Ökonomische Kriterien. Diese vier Kategorien wurden in mehrere, spezifischere Kriterien, wie Prestige, Masse und Komplexität aufgeteilt.

Der AHP kann zum paarweisen Vergleich der 'sub-Kriterien' innerhalb einer Obergruppe und zusätzlich zum Vergleich der Obergruppen angewendet werden. Oftmals sind die verschiedenen Konzepte bezüglich der spezifischeren 'sub-Kriterien' einfacher oder mit höherer Exaktheit zu bewerten. In diesem Fall beurteilt man die Alternativen bezüglich der 'sub-Kriterien' und multipliziert die Wertungen mit den Gewichtungsfaktoren. Die Summe dieser Werte zeigt, wie gut jedes Konzept hinsichtlich der jeweiligen Obergruppe ist. Eine erneute Multiplikation mit den Gewichtungsfaktoren der Obergruppen resultiert in der Gesamtpunktzahl für jede Variante.

3. Bewertung zukünftig möglicher Post-ISS-Konzepte (AP 2200)

3.1. Bewertungskriterien

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2000 wurden in Vorbereitung auf den Workshop von einem kleinen Expertenteam 19 Kriterien zusammengestellt. Anhand derer sollten ausgewählte Konzepte bewertet werden. Diese Kriterien wurden in vier Obergruppen geteilt:

- Politische Kriterien
- Soziale Kriterien
- Technische Kriterien
- Ökonomische Kriterien

Neben der Auswahl der Kriterien wurde jedes Einzelkriterium innerhalb seiner Obergruppe mithilfe des Analytischen Hierarchieprozesses (AHP) gewichtet. Die folgende Abbildung 1 zeigt die Zuordnung der aufgestellten Kriterien zu den vier Obergruppen.

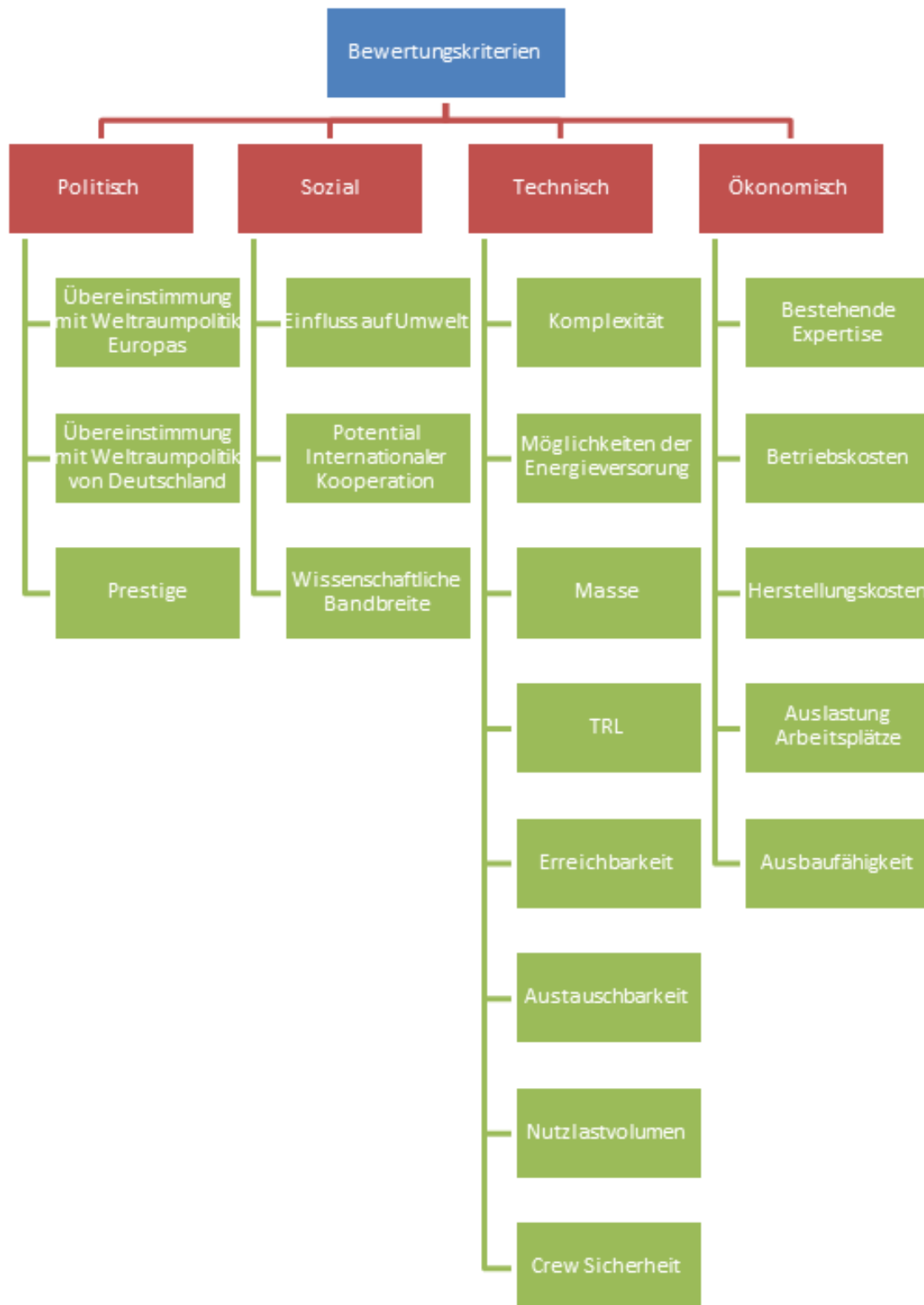


Abbildung 1: Übersicht über Bewertungskriterien

In den folgenden Tabellen werden die Kriterien aus Abbildung 1 näher beschrieben.

Tabelle 7: Beschreibung der politischen Bewertungskriterien

Bewertungskriterien	Beschreibung
Übereinstimmung mit der Weltraumpolitik Europas	<ul style="list-style-type: none"> Weltraumpolitik Europas setzt sich zusammen aus EU- und ESA-Politik.
Übereinstimmung mit der Weltraumpolitik Deutschlands	<ul style="list-style-type: none"> Weltraumpolitik Deutschlands setzt sich zusammen aus nationalem Programm des BMWi und der Wissenschaftskreise.
Prestige	<ul style="list-style-type: none"> Beinhaltet Prestige gegenüber anderen Staaten und eigener Bevölkerung. Eigenständigkeit oder Verbesserung des Status Quo führen zu höherem Prestige. Internationale kleinere Station als ISS wird mit geringem Prestige verbunden.

Tabelle 8: Beschreibung der sozialen Bewertungskriterien

Bewertungskriterien	Beschreibung
Einfluss auf die Umwelt	<ul style="list-style-type: none"> Auswirkungen von z.B. Treibstoff wie Hydrazin, Output von Feststoffboostern, Verwendung von Radioisotopengeneratoren (RTGs), Weltraumschrott und Unglücken mit Absturz auf bewohnten Gebieten
Potential Internationaler Kooperation	<ul style="list-style-type: none"> Bei dem Betrieb der orbitalen Struktur, bei der Durchführung gemeinsamer Experimente sowie bei dem Design und Bau des Konzeptes
Wissenschaftliche Bandbreite	<ul style="list-style-type: none"> Abdeckung der verschiedenen Wissenschaftsbereiche z.B. Observation, Humanphysiologie, Materialwissenschaften, Grundlagenphysik, Biologie oder Technologiedemonstration

Tabelle 9: Beschreibung der technischen Bewertungskriterien

Bewertungskriterien	Beschreibung
Komplexität	<ul style="list-style-type: none"> Komplexität beinhaltet z.B. Größe der orbitalen Struktur, Anzahl der Docking-Knoten oder Architektur, die für Betrieb benötigt wird.
Möglichkeiten der Energieerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> Lässt die Architektur größere Solarpaneele zu? Es ist nicht die Fähigkeit oder das KnowHow zu Energieerzeugungsmöglichkeiten gemeint.

Bewertungskriterien	Beschreibung
Masse	<ul style="list-style-type: none"> Indikator ist Anzahl an Starts
TRL	<ul style="list-style-type: none"> Technical Readiness Level
Erreichbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> Wie sieht die Logistikkette aus? Wie sieht das Docking System aus und wo ist es angebracht? Wie hoch ist die Versorgungsfrequenz?
Austauschbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> Austauschbarkeit bei Defekt oder veränderten Anforderungen Robustheit gegen Budgetschwankungen
Nutzlastvolumen	<ul style="list-style-type: none"> Beinhaltet sowohl internes als auch externes Volumen.
Crew Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> Wie sieht die Arbeit auf der orbitalen Struktur aus? Wie groß sind die Gefahrenpotentiale bei Transport zur und von orbitaler Struktur sowie beim Arbeiten auf orbitaler Struktur? Wie oft muss gedockt werden und wie sieht der Prozess des Dockens aus?

Tabelle 10: Beschreibung der ökonomischen Bewertungskriterien

Bewertungskriterien	Beschreibung
Bestehende Expertise	<ul style="list-style-type: none"> Wird auf bestehender Expertise aufgebaut?
Betriebskosten	<ul style="list-style-type: none"> Beinhaltet alle Kosten nach Fertigstellung im Orbit.
Herstellungskosten	<ul style="list-style-type: none"> Kosten für Aufbau und Entwicklung bis Fertigstellung im Orbit
Auslastung der Arbeitsplätze	<ul style="list-style-type: none"> Werden zusätzliche Arbeitsplätze geschaffen oder bestehende Arbeitsplätze erhalten?
Ausbaufähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> Ist die orbitale Struktur erweiterbar? Eine hohe Grundsteifigkeit, große Solarpanels und freie Docking-Adapter wirken sich positiv aus.

3.2. Anwendung des AHP auf Bewertungskriterien

Vor der Evaluierung der ausgewählten Konzepte wird der im letzten Kapitel beschriebene AHP zur Bestimmung der relativen Wichtigkeit jedes Kriteriums genutzt. Die Konzepte werden aus europäischer und aus internationaler Perspektive beurteilt. Deswegen gibt es für die politischen Bewertungskriterien zwei verschiedene paarweise Vergleichsmatrizen.

3.2.1. Politische Bewertungskriterien (aus Sicht Europas)

In Tabelle 11 werden die politischen Bewertungskriterien aufgelistet.

Tabelle 11: Legende für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht Europa)

T3	Requirements/Objectives
O1	Übereinstimmung mit Weltraumpolitik Europas
O2	Übereinstimmung mit Weltraumpolitik von Deutschland
O3	Prestige

Laut der Experten ist *Prestige* dominierend über die *Übereinstimmung mit der Weltraumpolitik Europas* bezüglich der Wichtigkeit in der Konzeptbewertung, und weiterhin nimmt *Prestige* ein sehr viel größere Bedeutung als die *Übereinstimmung mit dem Weltraumpolitik von Deutschland* ein. In Tabelle 12 sind diese Überlegungen in einer Vergleichsmatrix paarweise numerisch abgebildet.

Tabelle 12: Paarweise Vergleichsmatrix für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht Europa)

T4	O1j	O2j	O3j
O1i	1,00	0,25	0,11
O2i	4,00	1,00	0,20
O3i	9,00	5,00	1,00

Wie im Kapitel 3 beschrieben, war der nächste Schritt des AHP die Normalisierung der paarweisen Vergleichsmatrix. Das Ergebnis dieser Normalisierung ist in Tabelle 13 zu sehen.

Tabelle 13: Normalisierte Werte aus paarweisen Vergleichsmatrix für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht Europa)

T5	O1j	O2j	O3j
O1i	0,07	0,04	0,08
O2i	0,29	0,16	0,15
O3i	0,64	0,80	0,76

Aus der normalisierten Vergleichsmatrix können die Gewichtungsfaktoren berechnet werden, in dem die Werte einer Reihe summiert und durch die Anzahl der Kriterien geteilt werden. Der Gewichtungsfaktor des Prestige-Kriteriums, zum Beispiel, ist aufgerundet:

$$\frac{0,64 + 0,80 + 0,76}{3} = 0,74.$$

Formel 3: Gewichtungsfaktor des Prestige-Kriteriums

In Tabelle 14 sind die die Gewichtungsfaktoren für die politischen Bewertungskriterien gelistet.

Tabelle 14: Normalisierte Gewichtungsfaktoren für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht Europa)

T6	NWF
O1	0,07
O2	0,20
O3	0,74

Als Prüfung der Ergebnisse wurde die Konsistenzverhältniszahl der Vergleichsmatrix berechnet. Wie in Tabelle 15 angedeutet, ist diese Zahl kleiner als 0,1. Das bedeutet, dass die Vergleichsmatrix konsistent ist.

Tabelle 15: Konsistenzverhältniszahl für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht Europa)

CR =	0,070
------	-------

3.2.2. Politische Bewertungskriterien (aus Sicht International)

Die Bewertung der Konzepte bezüglich der politischen Kriterien ändert sich, wenn man sie aus Sicht der internationalen Gemeinschaft, anstelle ausschließlich der Deutsche Weltraumgemeinschaft, beurteilt. Die *Übereinstimmung mit der Weltraumpolitik von Deutschland* ist in diesem Fall kein Kriterium. Daher sind hier nur zwei Kriterien berücksichtigt, siehe Tabelle 16.

Tabelle 16: Legende für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht International)

T3	Requirements/Objectives
O1	Übereinstimmung mit Weltraumpolitik Europas
O2	Prestige

Laut der Experten ist *Prestige* dominierend über die *Übereinstimmung mit Europas Weltraumpolitik* bezüglich der Wichtigkeit zur Bewertung der Konzepte, wie in der Bewertung

der politischen Kriterien aus Sicht der Deutschen Weltraumgemeinschaft. Diese Bewertung ist in Tabelle 17 ausgedrückt.

Tabelle 17: Paarweise Vergleichsmatrix für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht International)

T4	O1j	O2j
O1i	1,00	0,25
O2i	9,00	1,00

Der nächste Schritt ist die Normalisierung der Vergleichsmatrix, Ergebnis in Tabelle 18.

Tabelle 18: Normalisierte Werte aus Paarweise Vergleichsmatrix für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht International)

T5	O1j	O2j
O1i	0,10	0,10
O2i	0,90	0,90

Die Summe der Werte aus einer Reihe, geteilt durch die Anzahl der Kriterien, ergibt den normalisierten Gewichtungsfaktor für die Bewertungskriterien. Die Gewichtungsfaktoren sind in Tabelle 19 zu sehen.

Tabelle 19: Normalisierte Gewichtungsfaktoren für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht International)

T6	NWF
O1	0,10
O2	0,90

Eine Konsistenzprüfung wurde mittels Berechnung einer Konsistenzverhältniszahl durchgeführt.

Tabelle 20: Konsistenzverhältniszahl für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht International)

CR =	0
------	---

3.2.3. Soziale Bewertungskriterien

Abbildung 1 zeigt die 19 Kriterien für die Bewertung der Konzepte. Innerhalb der Obergruppe *Soziale Kriterien* sind drei Bewertungskriterien definiert. Diese sind in Tabelle 21 erfasst.

Tabelle 21: Legende für die sozialen Bewertungskriterien

T3	Requirements/Objectives
O1	Einfluss auf Umwelt
O2	Potenzielle Internationaler Kooperation
O3	Wissenschaftliche Bandbreite

Die Experten schätzen, dass der potenzielle *Einfluss auf die Umwelt* etwas wichtiger ist als *potenzielle internationale Kooperation*. *Wissenschaftliche Bandbreite* wurde als etwas wichtiger beurteilt als der *Einfluss auf die Umwelt*, und als sehr viel wichtiger als *internationale Kooperation*.

Diese Abschätzungen sind in Tabelle 22 numerisch ausgedrückt.

Tabelle 22: Paarweise Vergleichsmatrix für die sozialen Bewertungskriterien

T4	O1j	O2j	O3j
O1i	1,00	3,00	0,33
O2i	0,33	1,00	0,17
O3i	3,00	6,00	1,00

Wie bei den politischen Bewertungskriterien wurde die paarweise Vergleichsmatrix normalisiert und die normalisierte Matrix der Gewichtungsfaktoren berechnet. Die Ergebnisse dieser Schritte sind in Tabelle 23 und Tabelle 24 zu finden.

Tabelle 23: Normalisierten Werte aus Paarweise Vergleichsmatrix für die sozialen Bewertungskriterien

T5	O1j	O2j	O3j
O1i	0,23	0,30	0,22
O2i	0,08	0,10	0,11
O3i	0,69	0,60	0,67

Tabelle 24: Normalisierte Gewichtungsfaktoren für die sozialen Bewertungskriterien

T6	NWF
O1	0,25
O2	0,10
O3	0,65

Tabelle 25 zeigt die Konsistenzverhältniszahl für diese Vergleichsmatrix. Wie vorher beschrieben, bedeutet ein Wert von weniger als 0,1, dass die Matrix konsistent ist.

Tabelle 25: Konsistenzverhältniszahl für die sozialen Bewertungskriterien

CR =	0,018
-------------	--------------

3.2.4. Technische Bewertungskriterien

Die Obergruppe *Technische Kriterien* umfasst die meisten Kriterien, und alle acht sind in Tabelle 26 aufgezeigt.

Tabelle 26: Legende für die technischen Bewertungskriterien

T3	Requirements/Objectives
O1	Komplexität
O2	Möglichkeiten der Energieversorgung
O3	Masse
O4	TRL
O5	Erreichbarkeit
O6	Austauschbarkeit
O7	Nutzlastvolumen
O8	Crew Sicherheit

Die Bewertung der Kriterien ist in der paarweisen Vergleichsmatrix in Tabelle 27 indiziert. *Crew Sicherheit* wurde von Experten als wichtigstes Kriterium evaluiert, etwas wichtiger als die *Masse* und sehr viel wichtiger als alle anderen Kriterien.

Tabelle 27: Paarweise Vergleichsmatrix für die technischen Bewertungskriterien

T4	O1j	O2j	O3j	O4j	O5j	O6j	O7j	O8j
O1i	1,00	0,33	0,25	3,00	1,00	2,00	0,50	0,17
O2i	3,00	1,00	0,33	6,00	3,00	3,00	4,00	0,25
O3i	4,00	3,00	1,00	5,00	4,00	2,00	5,00	0,50
O4i	0,33	0,17	0,20	1,00	0,33	1,00	0,17	0,20
O5i	1,00	0,33	0,25	3,00	1,00	2,00	0,33	0,25
O6i	0,50	0,33	0,50	1,00	0,50	1,00	0,25	0,25
O7i	2,00	0,25	0,20	6,00	3,00	4,00	1,00	0,20
O8i	6,00	4,00	2,00	5,00	4,00	4,00	5,00	1,00

Der nächste Schritt war die Normalisierung der Vergleichsmatrix, nachdem die Gewichtungsfaktoren berechnet wurden. Die normalisierte Matrix und Gewichtungsfaktoren sind in Tabelle 28 respektive Tabelle 29 angezeigt.

Tabelle 28: Normalisierten Werte aus Paarweise Vergleichsmatrix für die technischen Bewertungskriterien

T5	O1j	O2j	O3j	O4j	O5j	O6j	O7j	O8j
O1i	0,06	0,04	0,05	0,10	0,06	0,11	0,03	0,06
O2i	0,17	0,11	0,07	0,20	0,18	0,16	0,25	0,09
O3i	0,22	0,32	0,21	0,17	0,24	0,11	0,31	0,18
O4i	0,02	0,02	0,04	0,03	0,02	0,05	0,01	0,07
O5i	0,06	0,04	0,05	0,10	0,06	0,11	0,02	0,09
O6i	0,03	0,04	0,11	0,03	0,03	0,05	0,02	0,09
O7i	0,11	0,03	0,04	0,20	0,18	0,21	0,06	0,07
O8i	0,34	0,42	0,42	0,17	0,24	0,21	0,31	0,36

Wie bei anderen Kriterien schon beschrieben, wurden die normalisierten Gewichtungsfaktoren aus der paarweisen Vergleichsmatrix berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 29 abzulesen.

Tabelle 29: Normalisierte Gewichtungsfaktoren für die technischen Bewertungskriterien

T6	NWF
O1	0,06
O2	0,15
O3	0,22
O4	0,03
O5	0,06
O6	0,05
O7	0,11
O8	0,31

Die Konsistenzverhältniszahl ist größer als bei anderen Obergruppen, was aufgrund der höheren Anzahl der Kriterien auch zu erwarten ist. Wie in Tabelle 30 zu sehen, ist der Wert immer noch kleiner als 0,1, und die Vergleichsmatrix ist also konsistent.

Tabelle 30: Konsistenzverhältniszahl für die technischen Bewertungskriterien

CR =	0,094
-------------	--------------

3.2.5. Ökonomische Bewertungskriterien

Letztendlich wird der AHP auf die *Ökonomische Kriterien* angewendet. Die fünf Unterkriterien sind in Tabelle 31 nochmals gelistet.

Tabelle 31: Legende für die ökonomischen Bewertungskriterien

T3	Requirements/Objectives
O1	Bestehende Expertise
O2	Betriebskosten
O3	Herstellungskosten
O4	Auslastung Arbeitsplätze
O5	Ausbaufähigkeit

Wie zuvor wurde die relative Wichtigkeit durch die Experten bewertet. Wie in Tabelle 32 zu sehen ist, wurden Kriterium vier und fünf: *Auslastung Arbeitsplätze* respektive *Ausbaufähigkeit*, als wichtigste beurteilt. Diese Kriterien werden als etwas wichtiger eingeschätzt als die *bestehende Expertise*, die *Betriebskosten* und die *Herstellungskosten*.

Tabelle 32: Paarweise Vergleichsmatrix für die ökonomischen Bewertungskriterien

T4	O1j	O2j	O3j	O4j	O5j
O1i	1,00	1,00	3,00	0,33	0,33
O2i	1,00	1,00	3,00	0,25	0,33
O3i	0,33	0,33	1,00	0,25	0,33
O4i	3,00	4,00	4,00	1,00	1,00
O5i	3,00	3,00	3,00	1,00	1,00

Den beschriebenen Schritten des AHP folgend wurde erst die Vergleichsmatrix normalisiert und anschließend die Gewichtungsfaktoren berechnet. Die Ergebnisse dieser Schritte sind in Tabelle 33 und Tabelle 34 angegeben.

Tabelle 33: Normalisierten Werte aus Paarweise Vergleichsmatrix für die ökonomischen Bewertungskriterien

T5	O1j	O2j	O3j	O4j	O5j
O1i	0,12	0,11	0,21	0,12	0,11
O2i	0,12	0,11	0,21	0,09	0,11
O3i	0,04	0,04	0,07	0,09	0,11
O4i	0,36	0,43	0,29	0,35	0,33

O5i	0,36	0,32	0,21	0,35	0,33
------------	------	------	------	------	------

Tabelle 34: Normalisierte Gewichtungsfaktoren für die ökonomischen Bewertungskriterien

T6	NWF
O1	0,13
O2	0,13
O3	0,07
O4	0,35
O5	0,32

Tabelle 35 zeigt das Konsistenzverhältniszahl für diese Vergleichsmatrix. Auch diese Vergleichsmatrix ist konsistent, und deswegen sind die Ergebnisse vom AHP brauchbar.

Tabelle 35: Konsistenzverhältniszahl für die ökonomischen Bewertungskriterien

CR =	0,042
-------------	--------------

4. Bewertung der Anwendungen (AP 2300)

Innerhalb des Post-ISS Projekts wurden nicht nur Konzepte für eine Raumstation oder Beobachtungsplattform untersucht, sondern auch die Nutzlasten, die eventuell bei zukünftigen Missionen getestet werden können. Die Ergebnisse des Nutzlastenworkshops sind im separaten Bericht beschrieben [5].

Zwecks des Nutzlastenworkshops war es, für jeden Forschungsbereich, wie z.B. Materialphysik und Humanphysiologie, mehrere Nutzlasten zu entwerfen. Vorgesehen war ein paarweiser Vergleich der Nutzlastentwürfe mittels des AHP, um die Anzahl der Nutzlasten pro Bereich auf ein oder zwei einzuschränken.

Am Ende der Studien gab es weniger Nutzlasten als vorher geplant. Daher gab es keine Notwendigkeit, die Nutzlasten zu bewerten und die bestbewerteten auszuwählen. Stattdessen wurden die Anforderungen aller Nutzlasten in der Weiterentwicklung der Raumstation mitgenommen.

5. Interdisziplinärer Konzepte-Workshop (AP 4100)

Die Erstellung eines Post-ISS Gesamtszenarios, d.h. Architektur plus Nutzungs- und Experimentauslegung, erfolgte schrittweise. Ohne Architektur-Optionen ist es schwierig über potentielle wissenschaftliche Experimente zu diskutieren. Andererseits soll der Architekturvorschlag entsprechend den Anforderungen aus der Wissenschaftsgemeinde entworfen werden. Der Konzepte-Workshop diente hier als Startpunkt für alle nachfolgenden Entwicklungsschritte.

5.1. Workshop-Ziele

Unter folgender Zielstellung wurde der zweitägige Workshop in der Bremer CEF durchgeführt:

- Erstellen eines Modulfunktionsdiagramms
- Daraus Ableitung mehrerer Entwürfe einer Stationsarchitektur
- Bewertung der Architekturen nach vorgegebenen Kriterien
- Klärung spezifischer Fragen

Dazu wurde ein hinsichtlich Kompetenzbereich und Ausbildung gemischtes Team zusammengestellt, welches die benötigten Expertisen grob abdeckte. Im Gegensatz zum Standard-CE-Prozess waren die Teilnehmer jedoch nicht an ihre jeweilige Disziplin gebunden, sondern jeder war gefordert, möglichst zu vielen Bereichen Stellung zu nehmen.

5.2. Rahmenbedingungen

Folgende Randbedingungen wurden vor dem Workshop festgelegt:

Missionsziele:

- Bereitstellen einer Experimentier-Plattform im niedrigen Erdorbit (LEO) als "irdischer Außenposten"
- Schwerpunkt der Forschung liegt auf: Mikrogravitationsforschung, Humanphysiologie/ Medizin und Erdbeobachtung bzw. Deep-Space-Beobachtungen

Missionsanforderungen:

- Deep-Space-Beobachtungen sollen möglich sein
- Erdbeobachtungen sollen möglich sein
- Mikrogravitationsforschung soll möglich sein
- Medizinische Forschung soll möglich sein
- Die Orbithöhe soll größer als 300 km sein
- Die Orbitinklination sollte größer oder gleich 51° (wenn russische Rakete genutzt) sein
- Nutzlast-Akkommodation muss standardisiert sein
- Experimentergebnisse müssen mit höherer Frequenz als ISS rückführbar sein

- Die Crewgröße soll 3 + Kurzzeit-Besucher betragen
- Experimente müssen innerhalb von 2 Jahren entwickelt und mind. in Betrieb genommen werden
- Europäische Rückführkapazität zur Erde ermöglichen (z.B. ARV)
- Analysefähigkeiten im Orbit sollen vorhanden sein
- Beobachtbare Erdoberfläche sollte mindestens 85% betragen

Systemanforderungen:

- Die Experimentier-Plattform soll mindestens zeitweise bemannt sein für 10 Tage am Stück
- Die Ausrichtungsgenauigkeit sollte mindestens 0.1° betragen
- Es muss eine Mikrogravitation von 10^{-4} bis 10^{-6} g gewährleistet sein
- Die Energieversorgung sollte mind. 30 kW (Basis Station) und 20kW (Free Flyer) betragen
- Andockvorgänge sollen automatisch erfolgen (siehe ATV)
- Nutzlastmasse umfasst ca. 10t
- Die Plattform soll modular aufgebaut sein, um Austauschbarkeit von Komponenten zu gewährleisten
- Habitat und Laborbereich sollen entkoppelbar sein
- Externe Laborplattform soll robotisch betrieben werden können
- Wartung soll weitestgehend autonom oder robotisch erfolgen
- Dockvorgänge sollen mit international-standardisiertem Adapter durchgeführt werden
- Ein robustes Design soll Plug&Play ermöglichen
- Abfalllagerung soll möglich sein (Annahme ca. 3t)

5.3. Modulfunktionen

Zum Einstieg in die Thematik wurde ein Brainstorming zu Modulfunktionen durchgeführt. Dadurch bekam jeder Teilnehmer einen Überblick von den Funktionen, die eine mögliche Architektur im Erdorbit erfüllen muss und gleichzeitig wurden die verschiedenen Begriffe, die in diesem Zusammenhang verwendet wurden, erklärt. Das Ergebnis ist in einer Mind-Map in Abbildung 2 dargestellt und hat aufgrund des Brainstorming-Charakters keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder strikte Formulierung als reine Funktionen (wie z.B. bei bedruckt/ unbedruckt).

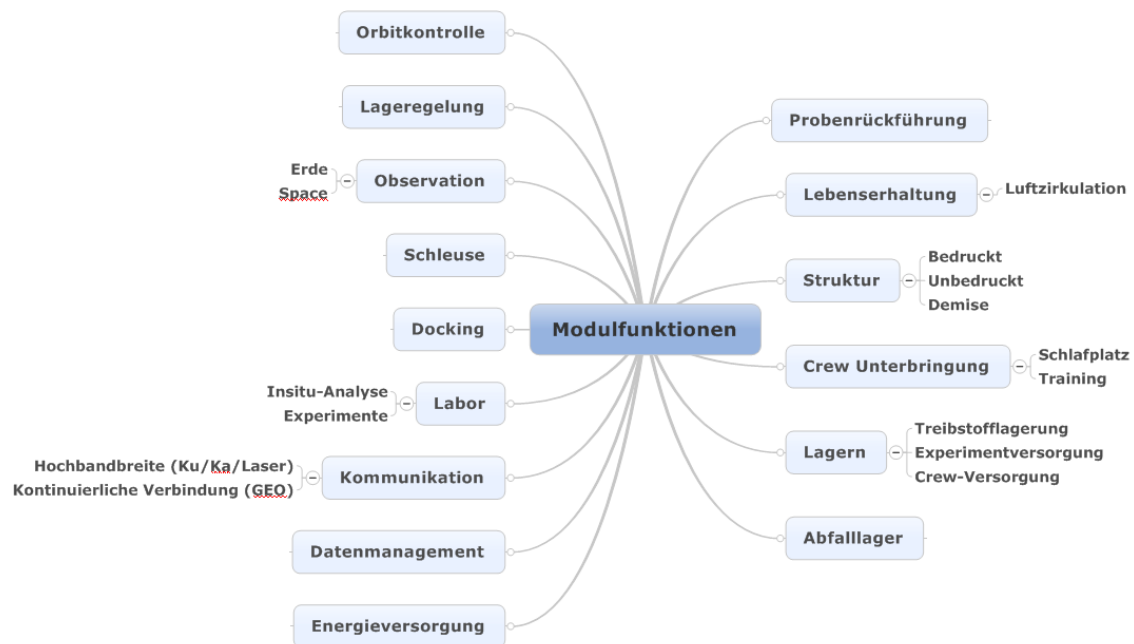


Abbildung 2: Mind-Map aus einem Brainstorming bezüglich Modulfunktionen einer Architektur im Erdorbit

5.4. Architektur-Optionen

Dieses Kapitel beschreibt die groben Möglichkeiten einer Architektur für eine zukünftige bemannte Raumfahrt im niedrigen Erdorbit. Dabei wird die Beschreibung aufgeteilt in zwei große Bereiche:

- Eine Mini-Station mit europäischer Hauptverantwortung (siehe Abschnitt 5.4.2)
- Annahme einer internationalen Großstation (mind. Mir-Größe) und Beteiligung mit kleineren Komponenten (z.B. einem Free Flyer) (siehe Abschnitt 5.4.3).

5.4.1. Vorgehensweise

Die Auswertung von möglichen Architekturoptionen wurde zuerst als Brainstorming über Optionen durchgeführt, welche in Tabellenform gesammelt wurde, um diese anschließend zu bewerten.

Für beide Gedankengänge wurden vielfache Optionen durch Variation der erdachten Elemente erstellt. Elemente waren:

- eine Plattform für Experimente (in Form einer Beobachtungsplattform für optische Instrumente oder einer Mikro-g-Plattform für Experimente der Material- oder Biowissenschaften),
- ein Habitatmodul, das auch Laborfunktion hat
- ein Habitatmodul ohne Laborfunktion, welches durch
- ein Labor, das abgetrennt werden kann, ergänzt wird.

Es wurde weiter davon ausgegangen, dass notwendige Funktionen wie Stromerzeugung mit Solarpaneelen an den jeweiligen Modulen erfüllt wurden. Eine erste Bewertung erfolgte durch eine Sammlung von Vor- und Nachteilen der jeweiligen Kurzentwürfe.

Durch das Studienteam als plausibel bewertete Optionen wurden zur weiteren Bewertung bzgl. Kriterien, die im Vorfeld erarbeitet wurden, ausgewählt.

5.4.2. Beschreibung der Option A: Mini-Station unter europäischer Führung

Für die Mini-Station wurde angenommen, dass diese durch Europa hauptverantwortlich geführt wird, wobei internationale Beteiligung nicht ausgeschlossen ist. Die Mini-Station basierte auf einem frühen Vorentwurf des Projektteams, s. Abbildung 3.

Da die Größe der Station im Vergleich zur ISS begrenzt ist, wurde beschlossen, dass der anfängliche Orbit vorerst bei 500 km liegen soll – wobei unklar war, ob dies mit den Startkapazitäten der Sojus-Kapsel vereinbar ist. Der Aufwand diesen Orbit zu halten, ist geringer als beim Orbit der ISS von 400 km. Ebenso sollten an diese Station mindestens zwei Fahrzeuge andocken können – ein Crew-Fahrzeug und ein Versorgungsfahrzeug.

Vorteilhaft bei einer Mini-Station: die europäische Eigenständigkeit, was u.a. den Aufwand für die Koordinierung reduziert als auch einen höheren Prestigegewinn zur Folge hat. Nachteilig ist der größere Aufwand bei den Starts der Module und dem Crew- bzw. Frachttransport. Insgesamt ist der Finanzbedarf bei dieser Option größer als bei einer Beteiligung mittels Free Flyer, der an einer größeren, internationalen Station docken kann.

Für alle Varianten der Ministation wurde vorausgesetzt, dass Missionen zur Technologiedemonstration immer möglich sind, unabhängig vom wissenschaftlichen Profil.



Abbildung 3: Vorentwurf einer Multi-Nutzlast-Plattform mit angedockten Kapseln, einem Labor (rechts) und einem Habitatmodul (Mitte links) sowie einer modularen Plattform (Mitte rechts) und Crew- und Versorgungskapseln (links).

5.4.2.1. Option A.1: Beobachtungsplattform

Neben der Grundausstattung verfügt diese Variante ausschließlich über eine Plattform zur Montage von Beobachtungsinstrumenten, wodurch der Strombedarf gering ist (Annahme: 20 kW). Ein Labor ist nicht vorgesehen und eine Crew wird nur während Servicemissionen benötigt, was den Aufwand bzgl. einer dauerhaft bemannten Station reduziert. Durch die Einschränkung auf Beobachtung wird das Nutzerprofil begrenzt ebenso wie die wissenschaftliche Bandbreite.

Option A.1.1: Beobachtungsplattform für Erdbeobachtung

In dieser Betrachtung wurde angenommen, dass ausschließlich Instrumente für Erdbeobachtung vorgesehen sind. Die Station ist demnach immer Nadir ausgerichtet. Zur sinnvollen Nutzung wurde vorausgesetzt, dass die Ausrichtungsgenauigkeit unter 1° liegt, dem Erfahrungswert der ISS. Weiter wurde eine Inklination von 50° - 70° bestimmt, um eine größtmögliche Abdeckung der Erdoberfläche zu erreichen. Diese hohe Inklination des Orbits erhöht allerdings auch den

Treibstoffbedarf, um die Station zu erreichen im Vergleich zu einer Station mit (nah-)äquatorialem Orbit. Weiter erschwert dies den Strahlenschutz für die Crew, da die Strahlung in der Nähe der Pole durch die konzentrierten Feldlinien des Magnetfeldes zunimmt, ca. Faktor 1000. Eine sonnensynchrone Bahn ist in diesen Inklinationsbereichen noch nicht möglich. Allerdings ist die Sonneneinstrahlung im Vergleich zu niedrig inklinierten Orbits erhöht, was den Wärmeeintrag steigert.

Option A.1.2: Beobachtungsplattform für Weltraum

Diese Stationsvariante ist inertial-stabilisiert und zum Zenit ausgerichtet, um Beobachtung von Weltraumzielen zu erleichtern. Eine Vorgabe der Orbitinklination ist hier nicht nötig, so dass niedrige Inklinationen möglich sind. Im Vergleich zu satellitengestützten Beobachtungsmissionen sind Wartung und Austausch durch neuere Instrumente erleichtert. Weiterhin kann die Kühlung ggf. nachgefüllt werden, so dass eine Mission nicht wegen mangelnder Kühlflüssigkeit beendet werden muss (vgl. Planck-Mission). Negativ, wie bei allen Weltraumbeobachtungsmissionen im Erdorbit sind die Effekte durch die Erde, d.h. Verdeckung des halben Himmels, Streustrahlung, Restatmosphäre (Beschädigung von Spiegel oder Linse) und bei gekühlten Experimenten auch die Wärmestrahlung der Erde. Weiter ist die Position der Sonne veränderlich.

Option A.1.3: Beobachtungsplattform für Weltraum und Erde

Diese dritte Variante mischt die Ziele und ermöglicht eine Beobachtung von Erde und Weltraum, bei einer Inklination vergleichbar zu *Option A.1.1*. Es wurde hier angenommen, dass die Ausrichtung sowohl Nadir als auch zum Zenit erfolgt und es zumindest zeitweise einen inertial-stabilisierte Flugmodus gibt. Durch die größere wissenschaftliche Gemeinschaft, die angesprochen werden kann, ist die Auslastung konstanter als im Falle der spezialisierten Beobachtung. Gleichzeitig steigen Aufwand und Komplexität. Der höheren Inklination folgt wieder ein höherer Wärmeeintrag. Zusätzlich steigert die Bedienung von zwei Beobachtungsarten die Masse des Gesamtsystems. Gleichzeitig ist allerdings auch hier die Wart- und Austauschbarkeit der Instrumente vorteilhaft.

Aufgrund der Vielseitigkeit und den guten Eigenschaften für Beobachtungsmissionen bei gleichzeitig moderaten Kosten durch das im Vergleich zur ISS eingeschränkte Missionsprofil, wurde diese Option für die weitere Bewertung ausgewählt.

5.4.2.2. Option A.2: Station mit integrierten Komponenten

Diese Grundversion sieht vor allem vor, dass die einzelnen Komponenten nicht strukturell entkoppelbar sind, um Habitat und Labor zu trennen, sondern zeitlich. Die bemenschten und unbemenschten Phasen würden sich abwechseln. Die Crew würde nur für einen Zeitraum von ca. zwei Monaten auf der Station verbleiben – innerhalb dieses Zeitraums kommt es zu den größten Effekten auf die menschliche Physiologie, so dass auch Humanphysiologie-Experimente noch effektiv durchgeführt werden können. Das Habitatmodul ist daher nur für die Servicing-Missionen

vorgesehen. In der crewlosen Zeit wird die Wartung von System und Experimenten durch Telerobotik ermöglicht. Die Inklination wird äquaturnah gewählt, da eine dedizierte Beobachtungsplattform nicht vorgesehen ist. Der Leistungsversorgungsbedarf wird auf 40 kW geschätzt.

Da die Station stets gekoppelt bleibt, sind der Betriebsaufwand und die Entwicklungskosten im Vergleich zu einem trennbaren System moderat. Es entfällt eine Dopplung der Systeme, was weiterhin der Systemmasse zugutekommt. Auch der kurze Crewverbleib reduziert die Betriebskosten, allerdings ebenso die für Physiologie Experimente zur Verfügung stehenden Zeit. Langzeitmissionen bzw. deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper sind hier nicht simulierbar. Die crewfreie Zeit ermöglicht dafür allerdings ungestörtere Bedingungen für Materialwissenschaften.

Option A.2.1: Mikro-g-Plattform

Diese Variante der integrierten Station besteht nur aus einem kleinen Habitatmodul für die Zeit des bemenschten Betriebs sowie eine Plattform für Mikro-g-Experimente. Dadurch wird der Bedarf an Leistungsversorgung auf lediglich 10 kW geschätzt. Eine Bedienung, bzw. Bestückung der Plattform erfolgt mittels Roboterarm vom Habitatmodul aus.

Auch hier ermöglicht die crewfreie Zeit ein störungsfreies Experimentieren. Zum Sparen von Strom und um die Störungen weiter zu reduzieren, kann das Habitat auch in einen Schlafmodus versetzt werden (beispielsweise. keine Ventilation, d.h. reduzierte Vibration). Der Verzicht auf ein bedrucktes Labor hat wenige Einsparungen zur Folge, da ein Habitat trotzdem entwickelt und betrieben wird. Dieses zu vergrößern, um Experimentierracks vorzusehen wäre ein geringer Aufwand.

Option A.2.2: Labor und Plattform

Option A.2.2 beinhaltet eine Kleinstation, die neben einer Experimentierplattform auch bedruckte Laborkapazität hat, in der terrestrische Atmosphärenbedingungen herrschen. Dieses Labor ist fest mit der Plattform verbunden. Dadurch wird das Nutzungsprofil gesteigert, die Möglichkeit der störungsfreien Experimente bleibt erhalten - allerdings nur reduziert, da die Bedingungen im Labor auch ohne Crew erhalten bleiben. Die Komplexität ist erhöht im Vergleich zur Station, die nur die Mikro-g-Plattform beinhaltet, sowohl bzgl. der Nutzung, des Baus als auch des Betriebs, was jeweils höhere Kosten bewirkt.

Aufgrund der Missionsvielfalt ist auch diese Option als sinnvolle Möglichkeit gewählt worden und wurde mit den weiteren Kriterien bewertet.

5.4.2.3. Option A.3: Station mit entkoppelbaren Komponenten

Die entkoppelbare Station zeichnet sich durch eine weitere Andockstelle aus, an der sie zusammengekoppelt wird. Jede Komponente muss alle Subsysteme enthalten, z.B. Lagekontrolle, Lebenserhaltungssystem und Datenmanagement. Dies und auch die wissenschaftlichen Anwendungsgebiete erhöhen den Leistungsbedarf auf geschätzte 40 kW.

Beobachtungsmissionen sind nicht generell vorgesehen.

Vor allem die Mikro-g-Experimente profitieren von der Abkopplung durch bessere μ g-Bedingungen. Weiter ist die Lageregelung der kleineren Komponenten einfacher. Die kurzen Crewzeiten ermöglichen einen einfacheren Betrieb und verbesserte μ g-Bedingungen für Materialwissenschaftlichen Experimente. Durch die Entkopplungsmöglichkeit steigt die Komplexität in Betrieb und System sowie die Masse, da die Subsysteme quasi gedoppelt werden. Die reduzierten Crewzeiten schränken die Möglichkeit von Physiologie Experimenten ein, auch sind die physiologischen Auswirkungen von Langzeitmissionen nicht simulierbar. Die von der Basisstation abgekoppelte Komponente ist nur eingeschränkt, bzw. verzögert wartbar.

Option A.3.1: Mikro-g-Plattform entkoppelbar vom Habitat (ohne Laborfunktion)

Diese Option beinhaltet lediglich ein Habitatmodul, welches keine eigenen Laborfunktionen hat und ausschließlich über eine Mikro-g-Plattform für Experimente verfügt. Dies hat einen geringen Energiebedarf zur Folge – der Leistungsverbrauch wird auf 10 kW geschätzt. Wie in der gekoppelten Variante wird auch hier die Bedienung durch einen Roboterarm erreicht. Ebenso kann hier das Habitat auch in einen Schlafmodus versetzt werden, wenn keine Astronauten an Bord sind. Insgesamt ist in dieser Zeit, bzw. der abgekoppelten Zeit der Umfang der Störungen begrenzt. Dies wird auch durch Wegfall der Schwingungen des Solarpanels begünstigt.

Option A.3.2: Labor und Plattform entkoppelbar vom Habitat (ohne Laborfunktion)

In dieser Variante existieren ein Labor und eine Plattform, die fest verbunden und zusammen von einem Habitat, welches selbst über keine Laborfunktion verfügt, entkoppelt werden können. Dadurch ergeben sich vor allem im Labor längere Mikro-G-Zeiten, allerdings bedeutet das vom Habitat abgekoppelte Labor ein Mehraufwand bzgl. des Lebenserhaltungssystems.

Option A.3.3: Mikro-g-Plattform entkoppelbar vom Habitat (mit Laborfunktion)

Diese Variante unterscheidet sich vor allem dadurch, dass das Habitat über eine Laborfunktion verfügt, allerdings nur die Mikro-g-Plattform entkoppelbar ist. Wie zuvor sind die atmosphärischen Bedingungen terrestrisch. Das Nutzungsprofil ist gesteigert, da durch die Astronauten noch Laborarbeit mit den Astronauten möglich ist. Dafür herrschen nur auf der entkoppelten Plattform die ausgezeichneten Mikro-g-Bedingungen.

5.4.2.4. Option A.4: Gemischte Missionsziele, Habitat mit Laborfunktion, entkoppelbares Labor und Plattform

Diese Variante ist ein Kompromiss zwischen allen Anforderungen und ermöglicht ein sehr breites Missionsspektrum. Das Hauptmodul fungiert als Habitat und stellt einen Laborbereich bereit, in dem Experimente mit weniger stringenten Mikro-g-Anforderungen durchgeführt werden können. Weiter gibt es ein Labormodul mit verbundener Plattform, welche vom Habitatmodul entkoppelt werden können. Weiter ist geplant, dass die Plattform sowohl für Mikro-g-Experimente eingesetzt werden kann, als auch für Beobachtungsmissionen. Daher sollte die Orbitinklination zwischen 50°-70° liegen. Auf diese Weise wird eine hohe Abdeckung der Erdoberfläche erreicht. Das breite Missionsprofil wird voraussichtlich einen größeren Leistungsbedarf zur Folge haben, geschätzt werden ca. 50 kW. Außerdem müssen alle Subsysteme inklusive des Lebenserhaltungssystems gedoppelt werden. Gleichzeitig macht das umfangreiche Nutzungsprofil die Station attraktiv für eine große wissenschaftliche Gemeinschaft und sorgt so für eine konstante Auslastung. Die Trennung der Komponenten ermöglicht bei Bedarf auch eine getrennte Ausrichtung, welches der Observation zugutekommen kann.



Abbildung 4: Konzeptzeichnung aus Workshopnachbereitung (DLR)

Gleichzeitig erhöht sich die Komplexität des Systems, was Einfluss auf die Nutzung, den Bau und den Betrieb hat und ein Kostentreiber sein kann. Durch die erhöhte Inklination steigt der Aufwand für Starts zur Station im Vergleich zu Optionen ohne Erdbeobachtungsmissionen.

Aufgrund der Vielseitigkeit dieser Variante wurde Option A.4 ebenfalls für die weitere Bewertung ausgewählt.

5.4.3. Beschreibung Option B: Internationale Großstation

Die Szenarien dieser Option gehen davon aus, dass es im internationalen Umfeld eine Station geben wird, welche eine Größe vergleichbar mit der Raumstation Mir hat. Mögliche Beispiele wären dafür die chinesische Station CSS (vgl. Abbildung) oder der russische Entwurf OPSEK. Auch bei einer Beteiligung soll der Betrieb/die Kommunikation der europäischen Komponenten eigenständig über ein europäisches Relaisystem wie EDRS erfolgen.

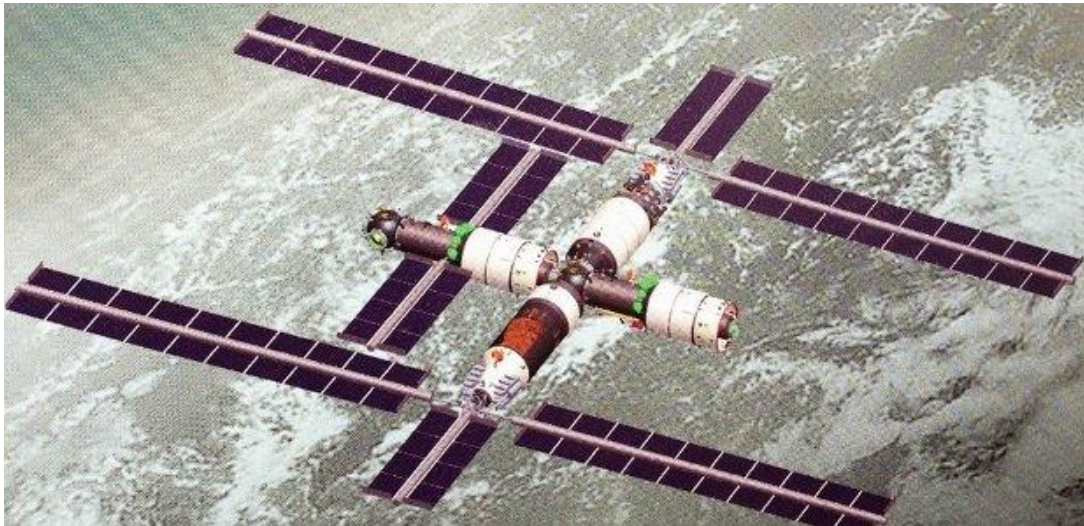


Abbildung 5: Aktuelles Konzept der chinesischen Raumstation (Quelle: chinanews.com).

Vorteile eines solchen Szenarios sind vor allem die Kosten- und Erfahrungsteilung mit internationalen Partnern. Weiter ist permanent eine Crew verfügbar, z.B. für Wartung. internationale Zusammenarbeit (politisch, wirtschaftlich, wissenschaftlich) und es gibt ein großes Potential für ein umfangreiches Nutzungsprofil und somit den Erhalt der aktuellen Wissenschafts-Gemeinschaft. Gleichzeitig wären der bürokratische Aufwand und die Kosten erhöht bei reduzierten Gestaltungsmöglichkeiten. Es würden vertragliche Verpflichtungen und Abhängigkeiten entstehen.

Option B.1: Europäisches Modul

Eine mögliche Beteiligung an dieser internationalen Station wäre eine Fortsetzung der aktuellen Beteiligung an der ISS, d.h. ein Modul, z.B. eines Labors. Dieses sollte mindestens 10 Nutzlastracks enthalten und eine Aufteilung wie das japanische Kibo-Modul besitzen, welche durch eine Trennung von Arbeits- und Stauraum und eine großzügige Plattform bietet. In einem solchen Fall könnte man vorhandene Erfahrung ausnutzen und bestehende Kenntnisse bzw. Programme fortführen. Gleichzeitig würde dies jedoch keinen Fortschritt in der Raumfahrttechnik bedeuten, da es keine neue Nutzung, Anlagen oder Anwendung gibt. Auch das Prestige bzw. die Öffentlichkeitswirksamkeit würden leiden. Die Mikro-g-Bedingungen wären eingeschränkt durch

die Kopplung mit der Station. Diese Option ist durch das Studienteam als zu unattraktiv für eine weitere Betrachtung erachtet worden.

Option B.2: Free Flyer

Die Option des Free Flyers ist gewissermaßen eine Variante einer Mini-Station, welche dieselben Vorteile – ungestörte Experimente – hat, ohne den vollen Aufwand einer eigenen Station mit sich zu bringen. Der Betrieb würde vom Boden aus erfolgen und damit unter europäischer Kontrolle bleiben können. Andockprozeduren würden automatisch erfolgen (und damit auf europäischer Erfahrung anknüpfen). Die Crew würde für den Experimentenaustausch eingesetzt werden und nicht an Bord verbleiben, so dass nur ein reduziertes Lebenserhaltungssystem notwendig ist. Es gibt eine einzige Andockstelle, um den Free Flyer mit der Station zu verbinden. Vorteile wären die ungestörten Mikro-g-Bedingungen und die größere Autonomie im Vergleich zur aktuellen Situation. Prestige und Öffentlichkeitswirksamkeit würden durch den technologischen Fortschritt steigen. Der Betrieb würde durch den geringeren Anteil an Barter-Kosten trotz des größeren Eigenaufwands voraussichtlich sinken. Zudem ist die Abhängigkeit von Partnern geringer. Nachteilig ist die eingeschränkte Verfügbarkeit der Crew und die hohe Komplexität, sowohl des Systems als auch des Betriebs. Bestimmte Subsysteme müssten gedoppelt werden und Wartung ist nur verzögert möglich.

Die wissenschaftliche Ausstattung des Free Flyers würde ggf. analog zur Ministation variiert werden können und die entsprechenden Vor- und Nachteile mit sich bringen. Zur Auswahl stehen eine Version mit:

- einem Labor
- einer Instrumentierplattform
- einem Labor und einer Plattform.

Aufgrund der Vielseitigkeit wurde die letzte Variante für die weitere Bewertung ausgewählt.

Option B.3: Andere Komponenten

Die Kategorie B.3 wurde stellvertretend für alle anderen möglichen Komponenten angesehen. Diese können reine Strukturelemente beinhalten, z.B. einen Dockingknoten oder einen Roboterarm oder alternativ ein Servicefahrzeug oder ein Orbittransferfahrzeug. Denkbar wäre auch eine Element mit elektrischen Triebwerken zur Kompensation der Effekte des Luftwiderstands. Vorteilhaft wären die Ermöglichung neuer Nutzungsfelder für die Station (z.B. Wartungsstation, Bahnhofsfunktion), welche Prestige und Öffentlichkeitswirksamkeit verbessern könnten und weiter notwendiges Element für zukünftige Missionen sein können. Es wären Technologieentwicklungen nötig, die auch an anderer Stelle der Raumfahrt Nutzen bringen könnten. Diese würden allerdings auch Kosten mit sich bringen, wenn man Neuentwicklungen betreibt und Gebiete mit europäischer Erfahrung verlässt. Kleine Komponenten würden ggf. nur wenig Prestige einbringen.

6. Bewertung der Szenarien (AP 2400)

Aus den in Arbeitspaket 4100 erläuterten Konzepten, wurden folgende vier in die engere Auswahl für die Bewertung genommen:

- Option A.1.3: Ministation, Gemischte Beobachtungsplattform
- Option A.2.2: Ministation, Integrierte Komponenten mit Labor und Plattform
- Option A.4: Ministation, Gemischte Missionsziele, Habitat mit Laborfunktion, entkoppelbarer Plattform
- Option B.2.3: Free Flyer mit Labor und Plattform (nur in Kombination mit mittelgroßer Raumstation anderer Nationen)

Jeder Teilnehmer hat im Plenum für jede Option eine Einschätzung abgegeben, ob sich diese hinsichtlich jedes einzelnen Kriteriums besser oder schlechter verhält als die Referenz-Architektur. Für die technischen Kriterien war „besser“ gleichbedeutend mit „einfacher herzustellen“ und „schlechter“ bedeutete „schwieriger“. Im europäischen Vergleich bildeten ATV und Columbusmodul die Referenz, aus internationaler Sicht immer die gesamte ISS. Dabei hatten die zu vergebenden Zahlenwerte folgende Bedeutung:

Tabelle 36: Zuordnung von Zahlenwerten und Bedeutung für die Bewertung

Zahlenwert	Bedeutung
3	Verhält sich sehr viel besser im Vergleich zur Referenz
2	Verhält sich viel besser im Vergleich zur Referenz
1	Verhält sich etwas besser im Vergleich zur Referenz
0	Verhält sich gleichwertig zur Referenz
-1	Verhält sich etwas schlechter im Vergleich zur Referenz
-2	Verhält sich viel schlechter im Vergleich zur Referenz
-3	Verhält sich sehr viel schlechter im Vergleich zur Referenz

Die jeweiligen Einzeleinschätzungen wurden über die Anzahl der Teilnehmer gemittelt und mit den Werten aus dem AHP verrechnet. Daraus ergab sich folgende Bewertung der Optionen (siehe Abbildung 6 und Abbildung 7):

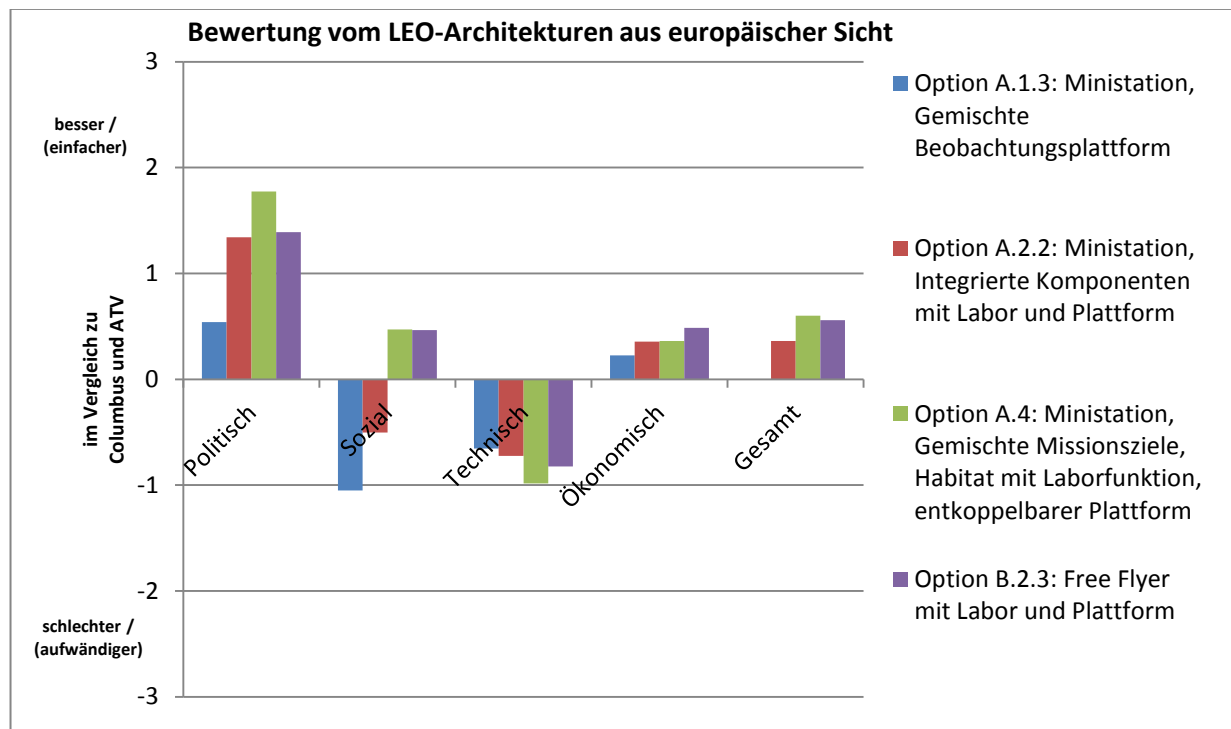


Abbildung 6: Bewertung von den LEO-Architekturen aus europäischer Sicht

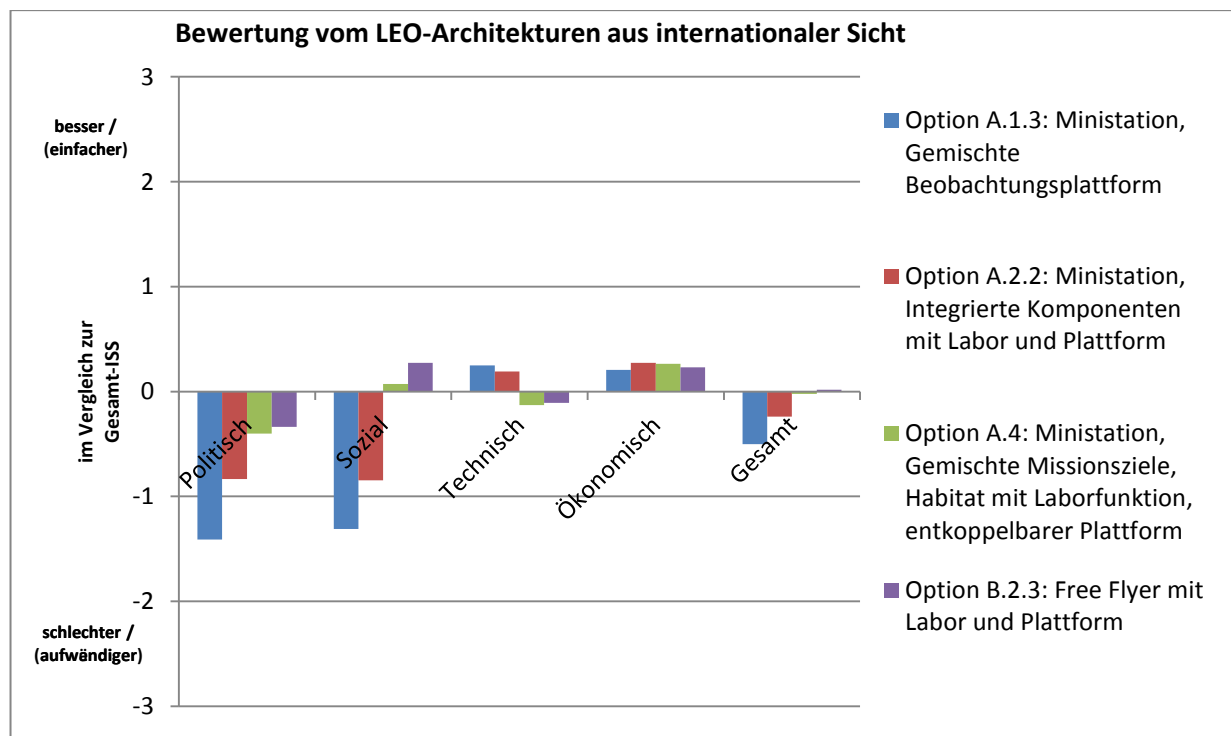


Abbildung 7: Bewertung von den LEO-Architekturen aus internationaler Sicht

Die Gesamtbewertung ergibt sich aus der Summe der vier Kriteriengruppen mit folgender beispielhaften Gewichtung:

- Politische Kriterien (0,3)
- Soziale Kriterien (0,15)
- Technische Kriterien (0,15)
- Ökonomische Kriterien (0,4)

Nach dieser Mittelung der Bewertung aus den Obergruppen liegt die Abweichung der Gesamtwerte vom Referenzwert bei maximal 0,5995 und damit bei 10% der verwendeten Skala. Dies kommt zum einen dadurch, dass sowohl die Obergruppen als auch die Gesamtbewertung einen Durchschnitt aus den Wertungen der Einzelkriterien darstellen. Zum anderen wird durch die geringe Abweichung vom Referenzwert deutlich, dass in Summe keine der Optionen eine besonders herausstechende Architektur darstellt, obwohl für die Bewertung der Einzelkriterien alle Werte zwischen -3 und 3 vergeben wurden. Generell handelt es sich bei Bewertung um eine relative, die vor allem Tendenzen zwischen den Optionen aufzeigen soll.

Tabelle 37: Bewertungsergebnis von LEO-Architekturen aus europäischer und internationaler Sicht im Vergleich zum Status Quo

Konzept	Bewertung aus europäischer Sicht	Bewertung aus internationaler Sicht
Option A.1.3: Ministation, Gemischte Beobachtungsplattform	-0,0032	-0,5011
Option A.2.2: Ministation, Integrierte Komponenten mit Labor und Plattform	0,3610	-0,2394
Option A.4: Ministation, Gemischte Missionsziele, 0,5995 Habitat mit Laborfunktion, entkoppelbarer Plattform		-0,0227
Option B.2.3: Free Flyer mit Labor und Plattform	0,5573	0,0157

Option A.4 und Option B.2.3 sind deutlich besser bewertet, aus europäischer und internationaler Sicht, als die anderen zwei Konzepte. Jedoch ist zwischen Option A.4 und Option B.2.3. kein klare Entscheidung zu treffen.

Aus diesem Grund wurden die kennzeichnenden Elementen von beide Konzepten zusammengefügt in ein neues 'Orbital Hub' Konzept.

Das 'Orbital Hub' Konzept besteht aus einer Ministation inklusive Habitat mit eingeschränkter Laborfunktion, wie in Option A.4 beschrieben. Anstelle einer entkoppelbaren Plattform enthält dieses Konzept einen Free Flyer mit Labor und Plattform, wie in Option B.2.3. Die Ministation und der Free Flyer wurden in zwei CE Studien innerhalb des Arbeitspaketes 4000 weiterentwickelt [6].

7. Zusammenfassung

Das DLR-Projekt POST-ISS (Systemanalyse-Studie) kann als vorbereitende Arbeit auf nationaler Ebene zur Schaffung eines zukünftigen bemannten Raumfahrtprogramms verstanden werden. Es sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, mit denen Europa auf lange Sicht die Aktivitäten für Forschung mit Astronauten im niederen Erdorbit (LEO) sichern kann.

Ein Arbeitspaket des Projekts betrifft den Entwurf von Infrastrukturkonzepten im Einklang mit Nutzeranforderungen zur Fortführung der bemannten Raumfahrt im LEO. Innerhalb eines CE-Workshops wurden verschiedene Konzepte und Varianten diskutiert, die auf heutiger Technologie aufbauen und für Europa eine Perspektive zur wissenschaftlichen Nutzung der bemannten Raumfahrt im näheren Erdorbit liefern können. Alle Optionen bewegen sich dabei im Rahmen des heutigen Engagements Europas in der bemannten Raumfahrt.

Entscheidungen bezüglich der entwickelten Konzepte sollten auf systematische und objektive Weise getroffen werden. Dafür wurde der Analytische Hierarchieprozess für einen paarweisen Vergleich genutzt, um die relative Relevanz der definierten Bewertungskriterien abzuschätzen.

Vier verschiedene Konzepte wurden von den Experten bewertet und dabei scheint unter Verwendung politischer, sozialer, technischer und ökonomischer Kriterien eine Mini-Plattform den größten Mehrwert für Europa und seine Forschung darzustellen: gemischte Missionsziele, ein Habitat mit Laborfunktion und einer entkoppelbaren Plattform oder die Entwicklung eines Free Flyers, der an Strukturen anderer Nationen angekoppelt werden kann.

Zwischen diesen zwei Alternativen ist in Rahmen dieses APs keine klare Entscheidung getroffen worden. Deswegen wurden die wichtigsten Elemente aus beiden Konzepten zusammengefügt in ein neues 'Orbital Hub' Konzept. Das 'Orbital Hub' Konzept besteht aus einer Mini-Plattform mit Habitat und eingeschränkter Laborfunktion, und einem Free Flyer mit Labor und Plattform.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über Bewertungskriterien	11
Abbildung 2: Mind-Map aus einem Brainstorming bezüglich Modulfunktionen einer Architektur im Erdorbit	25
Abbildung 3: Vorentwurf einer Multi-Nutzlast-Plattform mit angedockten Kapseln, einem Labor (rechts) und einem Habitatmodul (Mitte links) sowie einer modularen Plattform (Mitte rechts) und Crew- und Versorgungskapseln (links).	27
Abbildung 4: Konzeptzeichnung aus Workshopnachbereitung (DLR)	31
Abbildung 5: Aktuelles Konzept der chinesischen Raumstation (Quelle: chinanews.com).....	32
Abbildung 6: Bewertung von den LEO-Architekturen aus europäischer Sicht	35
Abbildung 7: Bewertung von den LEO-Architekturen aus internationaler Sicht.....	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bedeutung der Bewertungspunkte für die Entscheidungskriterien des Analytischen Hierarchieprozesses (*)	6
Tabelle 2: Paarweise Vergleichsmatrix, M.....	7
Tabelle 3: Normalisierte Paarweise Vergleichsmatrix, M	7
Tabelle 4: Normalisierte Gewichtungsfaktorenmatrix, w	8
Tabelle 5: Matrix resultierend aus Multiplizierung von Matrices M und w.....	8
Tabelle 6: 'Zufällige Konsistenz-faktor', R, als Produkt des Anzahl der Kriterien	9
Tabelle 7: Beschreibung der politischen Bewertungskriterien	12
Tabelle 8: Beschreibung der sozialen Bewertungskriterien	12
Tabelle 9: Beschreibung der technischen Bewertungskriterien	12
Tabelle 10: Beschreibung der ökonomischen Bewertungskriterien	13
Tabelle 11: Legende für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht Europa).....	14
Tabelle 12: Paarweise Vergleichsmatrix für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht Europa)	14
Tabelle 13: Normalisierte Werte aus paarweisen Vergleichsmatrix für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht Europa).....	14
Tabelle 14: Normalisierte Gewichtungsfaktoren für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht Europa)	15
Tabelle 15: Konsistenzverhältniszahl für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht Europa) .	15
Tabelle 16: Legende für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht International)	15
Tabelle 17: Paarweise Vergleichsmatrix für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht International).....	16
Tabelle 18: Normalisierte Werte aus Paarweise Vergleichsmatrix für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht International)	16

Tabelle 19: Normalisierte Gewichtungsfaktoren für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht International).....	16
Tabelle 20: Konsistenzverhältniszahl für die politischen Bewertungskriterien (aus Sicht International).....	16
Tabelle 21: Legende für die sozialen Bewertungskriterien.....	17
Tabelle 22: Paarweise Vergleichsmatrix für die sozialen Bewertungskriterien	17
Tabelle 23: Normalisierten Werte aus Paarweise Vergleichsmatrix für die sozialen Bewertungskriterien.....	17
Tabelle 24: Normalisierte Gewichtungsfaktoren für die sozialen Bewertungskriterien	17
Tabelle 25: Konsistenzverhältniszahl für die sozialen Bewertungskriterien	17
Tabelle 26: Legende für die technischen Bewertungskriterien	18
Tabelle 27: Paarweise Vergleichsmatrix für die technischen Bewertungskriterien	18
Tabelle 28: Normalisierten Werte aus Paarweise Vergleichsmatrix für die technischen Bewertungskriterien.....	19
Tabelle 29: Normalisierte Gewichtungsfaktoren für die technischen Bewertungskriterien	19
Tabelle 30: Konsistenzverhältniszahl für die technischen Bewertungskriterien	19
Tabelle 31: Legende für die ökonomischen Bewertungskriterien.....	20
Tabelle 32: Paarweise Vergleichsmatrix für die ökonomischen Bewertungskriterien	20
Tabelle 33: Normalisierten Werte aus Paarweise Vergleichsmatrix für die ökonomischen Bewertungskriterien.....	20
Tabelle 34: Normalisierte Gewichtungsfaktoren für die ökonomischen Bewertungskriterien	21
Tabelle 35: Konsistenzverhältniszahl für die ökonomischen Bewertungskriterien	21
Tabelle 36: Zuordnung von Zahlenwerten und Bedeutung für die Bewertung	34
Tabelle 37: Bewertungsergebnis von LEO-Architekturen aus europäischer und internationaler Sicht im Vergleich zum Status Quo.....	36

Formelverzeichnis

Formel 1: Beispiel Eigenwert Berechnung	8
Formel 2: Konsistenz-Index	8
Formel 3: Gewichtungsfaktor des Prestige-Kriteriums.....	15

Literaturverzeichnis

- [1] Selly, M. A.; Forman, E. H. (2001). *Decision by Objectives – How to convince others that you are right*. New Jersey and London, World Scientific Publishing
- [2] Saaty, T. L.; Alexander, J. M. (1989). *Conflict Resolution: The Analytic Hierarchy Approach*. New York, Praeger Publishers

- [3] Saaty, T. L.; Vargas, L. G. (2001). *Models, methods, concepts & applications of the Analytic Hierarchy Process*. Massachusetts, Kluwer Academic Publishers Group.
- [4] Saaty, T. L. (2008). *Decision making with the Analytic Hierarchy Process*. Int. J. Services Sciences, p. 83-98, Vol. 1, No. 1
- [5]. Philpot, C. et al. (2016), *Project Report: DLR-RY-Post-ISS-AP3000 „Post-ISS: Mögliche Anwendungen & Nutzlasten“*.
- [6]. Jahnke, S. et al. (2016). *DLR-RY-Post-ISS-AP4000 „Post-ISS:Szenarienentwurf“*.

Abkürzungsverzeichnis

A

AHP	Analytic Hierarchy Process
ATV	Automated Transfer Vehicle

C

CI	Consistency Index
CR	Consistency Ratio
CSA	Canadian Space Agency

D

DLR	German Aerospace Center
-----	-------------------------

I

ISS	International Space Station
-----	-----------------------------

L

LEO	Low Earth Orbit
-----	-----------------

N

NASA	National Aeronautics and Space Administration
------	-----------------------------------------------